

# **Análisis y metodología de ensayo de confort y condiciones de carga de material móvil ferroviario remolcado**

Ruiz Sandoval, Elia. España

[citef.ruiz@etsii.upm.es](mailto:citef.ruiz@etsii.upm.es)

Sanz Bobi, Juan de Dios. España

[citef.jdsbobi@etsii.upm.es](mailto:citef.jdsbobi@etsii.upm.es)

Cano Nogueras, Javier. España.

[citef.jcano@etsii.upm.es](mailto:citef.jcano@etsii.upm.es)

## **RESUMEN**

El objetivo de este estudio es realizar un análisis de las condiciones de carga y el confort del material móvil ferroviario remolcado y, posteriormente, desarrollar una metodología de ensayo válida. Se han estudiado, por un lado, las condiciones de carga a las que está sometido un bogie de un vehículo ferroviario y, por otro, el confort para un vehículo ferroviario equipado con el bogie en cuestión. Para ello se ha realizado un análisis de los requisitos de la normativa relacionada (sobre todo las UIC 515-4 y UIC 518), una especificación del protocolo de ensayo a seguir y una ejecución y análisis de los resultados obtenidos.

Esta metodología de estudio ha dado muy buen resultado a la hora de determinar, por un lado, los esfuerzos sufridos por un bogie en diferentes condiciones de carga y, por otro, las condiciones de confort de un material móvil ferroviario remolcado tanto en tara como en condiciones de carga máxima, en una circulación normal y variando su velocidad. Las herramientas software desarrolladas son muy flexibles y permiten su extensión a cualquier tipo de estudio de este tipo.

## **1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1 Objetivo y alcance**

Este trabajo tiene dos objetivos fundamentales:

El primero de ellos es el estudio de las condiciones de carga a las que está sometido un bogie de un vehículo ferroviario. Para ello se ha de realizar un análisis de los requisitos de la normativa relacionada, una especificación del protocolo de ensayo a seguir y una ejecución y análisis de los resultados obtenidos.

La normativa que define los ensayos a realizar está plasmada en la ficha técnica UIC 515-4 de la Unión Internacional del Ferrocarril.

El segundo objetivo es el estudio del confort para un vehículo ferroviario equipado con el bogie en

cuestión. Para ello la metodología de estudio es similar a la anterior, es decir, se ha de realizar un análisis de los requisitos de la normativa relacionada, una especificación del protocolo de ensayo a seguir y una ejecución y análisis de los resultados obtenidos.

La normativa que define los ensayos a realizar está plasmada en la ficha técnica UIC 518 de la Unión Internacional del Ferrocarril, aunque también se han consultado las normas UNE-ENV 12299 y la ISO 2631-1.

Para contrastar los resultados de los ensayos con la norma, se ha generado un programa informático con la herramienta Matlab que analice los datos obtenidos directamente de los ensayos y los compare con los criterios y valores límites establecidos.

## **1.2 Normativa relacionada**

Como marco de referencia para este estudio se dispone de las normas UIC correspondientes a cada uno de los ámbitos de estudio.

La Unión Internacional de Ferrocarriles (Union Internationale des chemins de fer, UIC) es una organización mundial fundada en 1922 para la cooperación internacional en el campo de los ferrocarriles y para la promoción del ferrocarril como medio de transporte a nivel mundial, para así conseguir cumplir con el reto de la movilidad y el desarrollo sostenible.

## **2. ESTUDIO ESTÁTICO Y DINÁMICO DE MATERIAL MÓVIL FERROVIARIO REMOLCADO**

### **2.1 Estudio de las condiciones de carga**

#### **2.1.1 Metodología de ensayo**

Para la validación de un primer estudio mediante el Método de Elementos Finitos (MEF) sobre las condiciones de carga del bogie se han llevado a cabo una serie de ensayos sobre un modelo de bogie en particular.

En estos ensayos se han determinado las tensiones en determinados puntos del bastidor del bogie del tren mediante la técnica de extensometría bajo las hipótesis de solicitaciones excepcionales y estáticas de simulación de esfuerzos principales encontrados.

El propósito de los ensayos estáticos definidos en la normativa UIC 515-4 es verificar la capacidad de los bastidores del bogie para soportar las cargas propias del servicio.

Los ensayos estáticos se subdividen en cuatro grupos:

- Ensayos estáticos para cargas excepcionales.
- Ensayos estáticos para simular las principales fuerzas sufridas en servicio.
- Ensayos estáticos para simular fuerzas particulares ocurridas en servicio.
- Ensayos de fatiga destinados a verificar la resistencia del bastidor de bogie y detectar cualquier punto débil oculto (especialmente en aquellos puntos en los que no se pueden poner galgas

extensiométricas) y evaluar el margen de seguridad.

Todos estos ensayos deben hacerse en todo bogie nuevo. Cuando un bogie ha sido ya ensayado pero comienza a ser construido por un nuevo fabricante o mediante un procedimiento nuevo, sólo se deberán llevar a cabo los ensayos de fatiga.

Para el caso de material rodante renovado, sólo deben llevarse a cabo los dos primeros ensayos estáticos definidos en la norma.

El propósito de los ensayos estáticos para cargas excepcionales es verificar que no hay ningún riesgo de deformación permanente del bastidor de bogie cuando se somete a los efectos combinados de las máximas cargas que pueden ocurrir durante el servicio.

Los valores de las fuerzas usadas en estos ensayos se seleccionan con el objetivo de representar las máximas cargas que pueden ocurrir en servicio, excluyendo las cargas debidas a accidentes. Las fuerzas longitudinales no se simulan en el programa de ensayos estáticos.

Los ensayos estáticos para simular los principales esfuerzos sufridos en servicio están diseñados para verificar la ausencia de cualquier riesgo de roturas por fatiga que puedan ocurrir bajo los efectos combinados de las principales fuerzas que se pueden encontrar en servicio (verticales, transversales, alabeo de la vía).

Los valores de las fuerzas usadas en estos ensayos se seleccionan con el objetivo de representar todas las cargas variables que soporta el bogie durante su vida útil.

El ensayo debe realizarse en un aparejo de pruebas que permita aplicar las fuerzas en las mismas localizaciones y distribuidas de la misma forma que ocurrirían durante el servicio, y de tal forma que se puedan simular correctamente el juego y las tolerancias asociadas con la suspensión y biela de arrastre.

Los ensayos incluyen someter al bastidor de bogie a diferentes casos de cargas que simularán:

- Circulación en vía recta.
- Circulación en vía curva.
- Variaciones en las fuerzas dinámicas debido a la rotación y a los rebotes.

El bastidor de bogie debe equiparse con galgas extensiométricas y rosetas de galgas extensiométricas en todos los puntos que soportan grandes tensiones, particularmente en aquellas áreas donde se acumulen las tensiones.

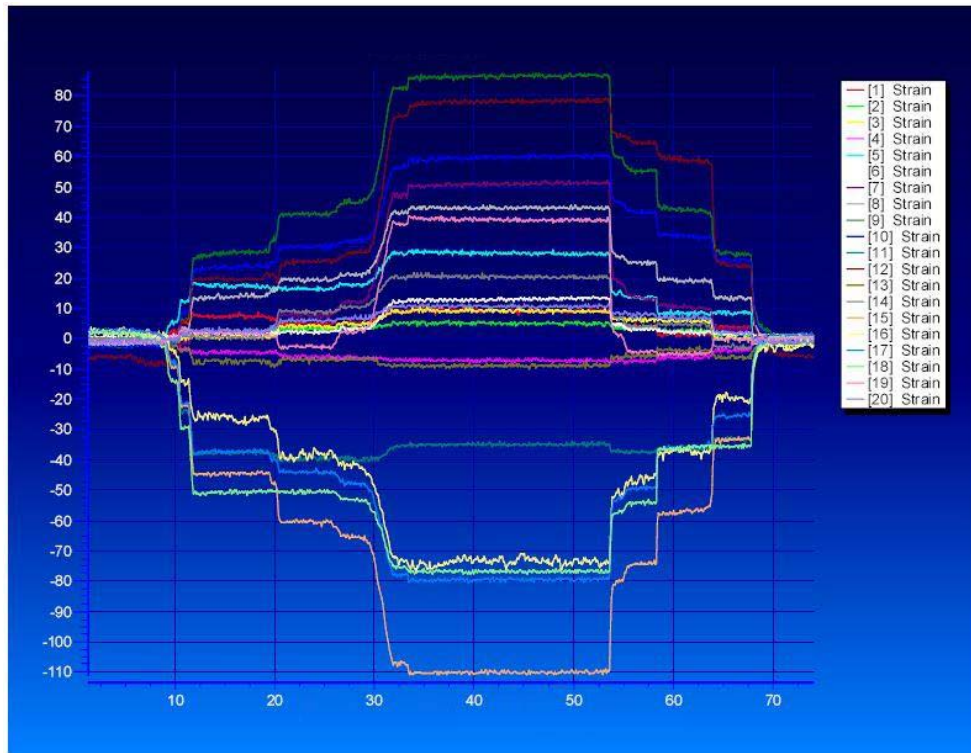
Después de realizar los ensayos, el límite elástico no debe ser excedido en ningún punto del bastidor y éste no debe mostrar ninguna deformación permanente después de retirar la carga.

La forma de realización de dichas medidas se basa en el uso de galgas extensiométricas pegadas de forma solidaria al acero en distintos puntos del bogie.

Los resultados de las medidas se comparan con los límites establecidos en la normativa UIC 515-4 en la forma establecida en ella, y se comprueba si el material rodante está dentro de los límites fijados.

### 2.1.2 Resultados

En cada punto de medida se deben medir las tensiones para cada caso de carga a partir de las deformaciones obtenidas por las galgas extensiométricas en tiempo real, a partir del valor obtenido en régimen estático.



**Figura 1 Medida de deformación en el bogie mediante galgas extensiométricas**

Después de realizar los ensayos estáticos para cargas excepcionales con fuerzas iguales a la mitad de los valores de las diferentes combinaciones de fuerzas definidas, el límite elástico no debe ser excedido en ningún punto del bastidor. Esto es, el bastidor del bogie no debe mostrar ninguna deformación permanente después de retirar la carga.

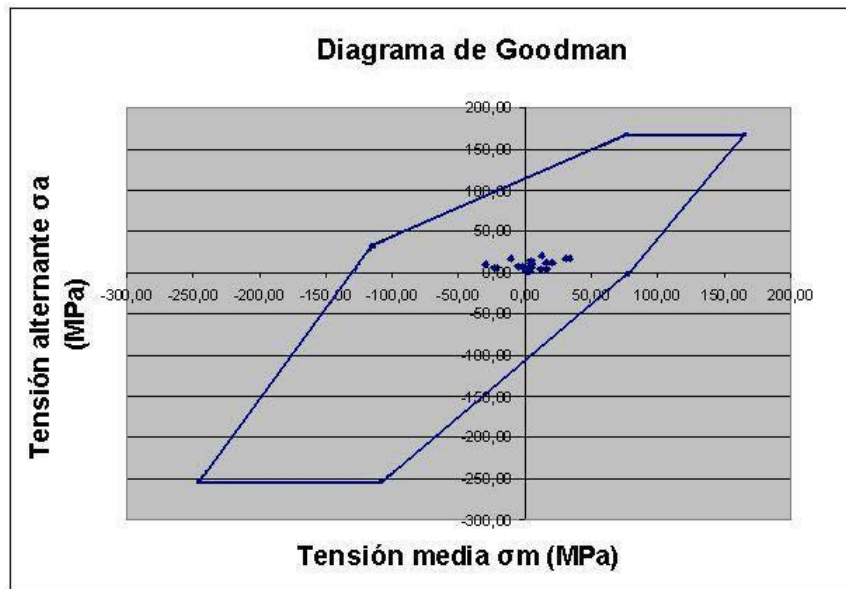
Como la simulación estática de fuerzas excluye cualquier influencia de los efectos de inercia, que varía dependiendo de la posición en relación con las partes de la suspensión, los valores de las cargas definidas para los ensayos estáticos bajo cargas excepcionales se corresponden con la parte del bogie comprimida entre la suspensión primaria y la secundaria.

Por otro lado, después de realizar los ensayos estáticos para simular los principales esfuerzos sufridos en servicio deben obtenerse, de entre los valores de tensión en cada caso de carga, la tensión mínima  $\sigma_{min}$  y la tensión máxima  $\sigma_{max}$  se utilizarán para determinar los parámetros  $\sigma_m$  tensión media y  $\sigma_a$  tensión alternante:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{min} + \sigma_{max}}{2} \quad \sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$

La hipótesis que se maneja en este informe es que, cuando aparece una grieta por fatiga en un punto de la estructura, ésta progresará en la dirección perpendicular a la dirección de la máxima tensión normal.

Por último se trasladan los puntos a un diagrama de Goodman que establece los valores límite admisibles:



**Figura 2 Diagrama de Goodman**

Sin embargo, se permite sobrepasar estos límites de tensión hasta en un 20% en un número limitado de puntos de medida siempre y cuando estos puntos se controlen cuidadosamente durante los ensayos dinámicos de fatiga.

## **2.2 Estudio de seguridad y confort**

### **2.2.1 Metodología de ensayo**

Para la validación de un segundo estudio de condiciones de confort se han llevado a cabo otra serie de ensayos, en los que se han determinado las medidas de aceleración longitudinal, transversal y vertical en el bogie y en la caja del tren mediante la instalación de acelerómetros, en circulación normal a diferentes velocidades.

El objeto de los ensayos dinámicos definidos en la normativa UIC 518 es el análisis de seguridad y comportamiento dinámico de un cierto modelo de bogie.

La realización de estos ensayos consiste en el registro simultáneo y posterior análisis de la seguridad y del comportamiento dinámico de unas ciertas unidades de material móvil ferroviario remolcado, en condiciones de tara y de carga máxima, alternativamente.

Los valores establecidos en la norma UIC 518 están referidos al ancho internacional de vía, pero se pueden tomar como una referencia también para el caso de ancho métrico.

El ensayo de los bogies pretende comprobar que los parámetros de circulación son correctos en su funcionamiento normal.

Para el caso de un vehículo convencional renovado, el método a utilizar según la norma es el método simplificado. Los métodos de medida simplificados se han desarrollado en base a la experiencia ganada en los ferrocarriles con vehículos convencionales, que se basan en las medidas de aceleración

en el bastidor del bogie ( $\ddot{y}^+$ ) y en la caja ( $\ddot{y}^*$  y  $\ddot{z}^*$ ) para los vehículos con bogie.

Las condiciones de funcionamiento durante los ensayos deben incluir todas las combinaciones en términos de:

- velocidad,
- insuficiencia de peralte,
- radio de curvatura.

La condición de carga para el vehículo debe ser descargado, en orden de marcha y con la carga normal. La posición del vehículo en la unidad del tren, que en el caso de estudio es un vehículo remolcado, debe ser hacia la parte de atrás, con acoplamiento suelto. Si es posible, el ensayo debe realizarse en las dos direcciones del viaje.

El raíl debe estar seco, y en cualquier caso las condiciones de la vía y las condiciones atmosféricas deben tener constancia en el informe. La partición de las vías de ensayo en secciones se requiere para el análisis estadístico posterior.

La evaluación del comportamiento dinámico del vehículo (seguridad, fatiga de la vía y comportamiento en funcionamiento) deben estar basadas en la determinación de unas magnitudes de evaluación obtenidas de las magnitudes medidas.

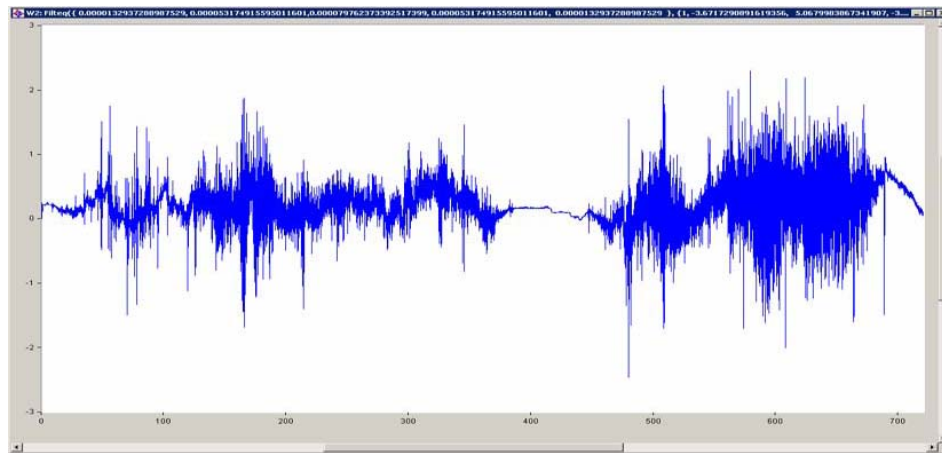
En la ficha técnica UIC 518-1 aparecen recogidas las reglas del proceso para las señales medidas, según el método simplificado, así como los métodos de procesamiento de las magnitudes de evaluación, por sección y por zona de ensayo, los criterios de inestabilidad, y los valores límite para las magnitudes de evaluación por el método simplificado.

Para contrastar los resultados de los ensayos con la norma, se ha generado un programa informático con la herramienta Matlab que analiza los datos obtenidos directamente de los ensayos y los compara con los criterios y valores límites establecidos.

### **2.2.2 Resultados**

A partir de los acelerómetros instalados en los bogies y en la caja del vehículo se obtienen los valores de aceleración en cada punto para cada instante.

Sin embargo, debido a las características de los acelerómetros, se registran frecuencias mucho mayores que las que son objeto de estudio, por lo que es preciso filtrar la señal para su procesamiento.



**Figura 3 Medida de aceleración en el bogie**

Este análisis sólo permite obtener unos ciertos valores máximos y mínimos de las aceleraciones a lo largo de todo el recorrido.

Para calcular los parámetros que establece la norma UIC 518-1 relativa a la seguridad y a la calidad de la marcha es necesario utilizar un software más avanzado y un cálculo más preciso. Se ha utilizado una aplicación informática desarrollada en Matlab para el cálculo de los parámetros de seguridad y confort, en base a la ficha UIC 518.

Se trata de un programa fácilmente adaptable a diferentes condiciones de la vía, ancho de vía e insuficiencia de peralte admisible, así como a las condiciones de los vagones, con parámetros tales como la masa por eje o la masa de los bogies, y permite variar las condiciones de filtrado de las señales de entrada. El resultado es un informe comparativo entre los valores obtenidos del análisis estadístico para cada acelerómetro en cada caso de circulación y el límite establecido por la norma.

### 3. CONCLUSIONES

La metodología de estudio desarrollada en el presente artículo ha dado muy buen resultado a la hora de determinar, por un lado, los esfuerzos sufridos por un bogie en diferentes condiciones de carga y, por otro, las condiciones de confort de un material móvil ferroviario remolcado tanto en tara como en condiciones de carga máxima, en una circulación normal y variando su velocidad.

Como aplicaciones prácticas, esta metodología sirve para la comprobación de material móvil ferroviario remolcado, en cuanto a su respuesta a las sollicitaciones de carga contempladas en situación estática y en cuanto a la posibilidad de estudio de diferentes condiciones de circulación. En particular, se puede llevar a cabo tanto para el caso de material ferroviario remolcado nuevo como renovado, y no sólo para ancho de vía internacional, sino también para el caso de otros anchos de vía, tomando como referencia los valores establecidos en la normativa.

#### 4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

NORMA UNE-ENV 12299 (1999). *Aplicaciones ferroviarias. Comodidad de viaje para los viajeros. Medición y evaluación.*

INTERNATIONAL STANDARD ISO 2631-1 (1997). *Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration.*

ROMANO, P. (1997). *Dinámica del vehículo ferroviario*. Ed. Levrotto & Bella. ISBN: 88-821-8001-8.

LÓPEZ PITA, A. (2006). *Infraestructuras ferroviarias*. Ediciones UPC (World Scientific). ISBN: 84-830-1853-5.

STOW, J., ANDERSSON, E. (2006). *Handbook of Railway Vehicle Dynamics*. CRC Press, Simon Iwnicki.

HAIGERMOSER, A. (2002). *Schienenfahrzeuge*. Technischen Univesität Graz, Austria.

VERA, C. (2003). *Prestaciones de los vehículos ferroviarios*. V Curso de Especialización en Tecnologías Ferroviarias. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid.

SANZ BOBI, J.D., SUÁREZ ESTEBAN, B., GARZÓN NÚÑEZ, J. y BRUNEL VÁZQUEZ, J.A. (2009). Protection High Speed Trains against lateral wind effects. *Proceedings of IMECE 2009. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 13-19 November 2009*. Florida, USA.